

원료별 식이섬유의 밀가루 대체 시 가공적성 및 전분소화지연효과

이홍임¹ · 이현규¹ · 배인영^{2*}

¹한양대학교 식품영양학과, ²극동대학교 한약발효학과

Impact of Dietary Fibers from Various Source in Wheat Flour Gel Model: Aspect of Suitability of Processing and *In Vitro* Starch Digestibility

Hong Im Lee¹, Hyeon Gyu Lee¹, and In Young Bae^{2*}

¹Department of Food and Nutrition, Hanyang University,

²Department of Oriental Medicine Fermentation, Far East University

Abstract

Wheat flour in a gel model was replaced with dietary fibers from various sources (oat, pea, potato, and wheat) in order to investigate their baking quality and *in vitro* starch digestibility. Then their hydration properties and solvent retention capacities (SRC) were measured. Over all, the gels with dietary fibers experienced increased water absorption index, swelling power, and SRC values, while water solubility decreased dose-dependently. The storage modulus (G') and loss modulus (G'') of the wheat flour gel increased by the addition of pea and potato fibers but decreased by oat and wheat fibers. The wheat flour gels with dietary fibers showed considerable decreases in the amount of released glucose. Also wheat flour replacement with dietary fibers lowered RDS and increased RS. Among SRC values, water and sucrose showed significant positive correlations with TDF and IDF. The contents of TDF, IDF, and SDF were highly correlated with RS (positive) and pGI (negative). Specially, for lowering starch digestibility, TDF and IDF were more important factors than SDF.

Key words: dietary fiber, wheat flour model gel, solvent retention capacity, *in vitro* starch digestibility

서 론

식이섬유의 섭취량 증가는 관상동맥질환, 비만, 당뇨, 암 등의 발병위험을 감소시키는 효과가 있다(Mann & Cummings, 2009). 또한, 높은 점성을 보이는 식이섬유는 인체 내에서 위장통과시간을 늦추고 전분소화를 지연시켜 최종적으로 혈당지수(glycaemic index)를 변화시킨다(Dikeman & Fahey, 2006). 이와 같이, 식이섬유의 건강기능성에 대한 인식이 소비자들에게 높아지면서 다양한 식품 원료에서 유래한 식이섬유의 기능성과 식품학적 응용에 대한 연구들이 증가하고 있다. Pourfarzad et al.(2013)은 coffee silver skin 을 식이섬유로 사용하여 관능적으로 유의적인 차이가 없는 제빵제조가 가능함을 보고하였다. 또한, Navarro-González

et al.(2011)은 토마토 과피에서 얻은 식이섬유의 항산화 활성과 포도당 흡수지연효과 등을 보고하여 건강기능성 소재로의 적용가능성을 제시하였다.

한편, 식품산업에서 식이섬유는 유제품이나 베이커리 등 다양한 식품군에 적용되고 있다(Thondre et al., 2010; Elleuch et al., 2011; Pourfarzad et al., 2013). 식품 제조 시 원료의 일부를 식이섬유로 대체 또는 첨가할 경우 겔형성능, 수분흡착능, 지방흡착능 및 유화능 등이 증가하여 최종 제품의 텍스처가 변화된다. 예를 들면, 겔에 포함된 분산매가 유출되는 현상을 감소시키고, 고지방 또는 이물질 식품의 형태를 안정화하여 저장성을 개선할 수 있다(Elleuch et al., 2011). 그러나 식이섬유를 베이커리에 적용할 경우에는 오히려 식이섬유가 전분-글루텐 구조를 파괴하여 반죽의 물성을 변화시켜 최종제품의 부피 감소 및 경도 증가 등으로 관능적 품질을 저하시키기도 한다(Angioloni & Collar, 2009a). 따라서 최근에는 원료 식이섬유의 가공적성을 분석하여 최종 제품의 품질을 예측할 수 있는 연구가 보고되고 있다. Duyvejonck et al.(2012)은 밀가루의 품종에 따른 용매흡착능을 분석하여 쿠키 및 제빵용으로의 적합성을 예

*Corresponding author: In Young Bae, Department of Oriental Medicine Fermentation, Far East University, Gangok 369-700, Korea
Tel: +82-43-880-3160; Fax: +82-43-879-3730

E-mail: iybae@kdu.ac.kr

Received September 1, 2013; revised October 15, 2013; accepted October 21, 2013

측할 수 있는 방안을 검토하였다. 즉, 품종별 밀가루의 물, 설탕, sodium carbonate, lactic acid에 대한 흡착능과 베이커리 제조에 적용한 후 품질을 분석한 결과 간의 상관성을 구축함으로써 특정 용매에 대한 흡착능이 최종 제품의 품질을 예측할 수 있음을 보고하였다. Angioloni & Collar(2011)은 구조형성 작용과 프리바이오틱스 작용을 하는 식이섬유들의 혼합조건에 따른 용매흡착능을 기반으로 제빵에 따른 품질평가 및 혈당지수 저하 효과를 보고하기도 하였다.

이상과 같이, 식이섬유는 건강기능적 및 식품학적인 측면에서 모두 매우 의미 있는 식품소재로 인식되지만, 식이섬유의 종류와 특성에 따라 식품에 적용 시 최종 제품의 품질변화를 유발하는 정도와 성인병 예방에 대한 효과에서 차이가 발생한다. 그러나 다양한 원료에서 추출한 식이섬유들의 이화학적 특성에 따른 식품학적 가공적성과 건강기능성에 대한 체계적인 연구는 미비하다. 따라서 다양한 원료에서 얻은 식이섬유를 밀가루에 대체 시 용매흡착능을 기반으로 가공적성을 예상하고, 전분소화지연에 대한 효과를 평가함으로써 건강지향성 식품제조 시 원료별 식이섬유의 식품학적 적용 기준을 검토하고자 하였다.

재료 및 방법

시약 및 재료

귀리, 콩, 감자, 밀에서 유래한 원료별 식이섬유는 JRS (Rosenberg, Germany) 제품으로 상온에서 보관하여 사용하였다. 밀가루는 제일제당(CJ Cheiljedang, Seoul, Korea)의 박력분을 구입하여 사용하였다. 분석에 사용한 total dietary fiber assay kit (TDF-100A), pancreatin from porcine pancreas (P7545, activity 8XUSP/g), amyloglucosidase (A9913)는 Sigma-Aldrich (St Louis, MO, USA), total starch assay kit (K-TSTA)와 glucose oxidase-peroxidase assay kit (GOPOD, K-GLUC)는 Megazyme International Ireland Ltd. (Bray, Ireland)에서 각각 구입하여 사용하였다.

식이섬유 및 전분 함량 분석

다양한 식이섬유에 함유된 식이섬유 함량은 효소중량법을 사용하여 분석하였다(AOAC, 2000). 식이섬유는 수용성 식이섬유(Soluble Dietary Fiber, SDF)와 불용성식이섬유(Insoluble Dietary Fiber, IDF)로 나누어 측정하였고, 두 종류의 합을 총식이섬유(Total Dietary Fiber, TDF)로 계산하였다. 시료 0.5 g에 MES/TRIS buffer 20 mL과 alpha-amylase 25 µL를 가하여 97°C에서 15분간 진탕배양 하였다. 온도를 60°C로 낮추어 protease solution 50 µL 가하여 60°C에서 30분간 진탕 후, 0.561 N HCl 또는 6 N NaOH를 이용하여 pH를 4.5±0.5사이로 조정하였다. 반응액에 amyloglucosidase 150 µL를 첨가하여 60°C에서 30분간 진탕한 후, 향량된 glass filter에 효소 분해한 시료를 넣고 감압 여과한 다음, 70°C

로 예열한 증류수 5 mL을 가하여 세척하였다. SDF 정량은 여과된 시료에 60°C로 예열한 95% 에탄올을 4배 용량으로 가하고 78% 에탄올, 95% 에탄올, 아세톤 순으로 각각 7.5 mL을 가하여 두 번씩 세척 및 여과한 다음, filter glass는 건조기에서 105°C로 24시간 동안 건조 후 1시간 방냉하여 잔사량을 구하였다. IDF는 여과한 후 남은 잔사에 95% 에탄올 5 mL을 가하여 2회 세척 후 105°C에서 24시간 동안 건조 후 1시간 방냉하여 잔사량을 구했다. 이상과 같은 방법으로 얻은 SDF 및 IDF 잔사량을 시료 100 g 당 함유된 양(g)으로 환산하여 % 단위로 표시하였고, TDF는 SDF와 IDF의 합으로 계산하였다.

수화능 및 용매흡착능 분석

원료별 식이섬유의 수분흡수지수(Water Absorption Index, WAI), 수분용해도 (Water Solubility, WS), 팽윤력 (Swelling Power, SP)은 Lee & Inglett(2006)이 제안한 방법을 변형하여 측정하였다. 식이섬유 250 mg이 포함된 원심분리튜브에 증류수를 10 mL씩 넣고 분산시킨 후, 상온에서 30분간 방치한 다음, 3,000×g에서 20분간 원심분리 하였다. WAI와 WS는 각각 원심분리 하여 얻은 침전물과 상등액의 중량을 측정하여 시료에 대한 백분율로서 산출하여 구하였고, SP는 WAI와 WS를 이용하여 아래의 식으로부터 산출하였다. 한편, 밀가루 대체에 따른 수화능 변화는 밀가루와 원료별 식이섬유의 대체수준에 따라 혼합된 분말을 정량하여 동일한 방법으로 분석하였다.

$$\text{Water solubility (\%)} = \frac{\text{Dry supernatant weight}}{\text{Dry sample weight}} \times 100$$

$$\text{Swelling power (g/g)} = \frac{\text{Wet sediment weight}}{\text{Dry sample weight} \times (100\% \text{ solubility})} \times 100$$

$$\text{Water absorption index} = \frac{\text{Residual sample weight}}{\text{Dry sample weight}}$$

용매흡착능(Solvent Retention Capacity, SRC)은 AACC (2000) methods 56-11방법을 변형하여 측정하였다(AACC, 2000). 밀가루와 원료별 식이섬유의 대체수준에 따라 혼합된 분말 1 g이 포함된 원심분리튜브에 증류수, 설탕(50%, w/w), sodium carbonate(5%, w/w), lactic acid(5%, w/w)를 각각 5 g씩 넣고 분산시킨 후, 상온에서 20분간 방치한 다음, 1,000×g에서 15분간 원심분리 하여 얻은 침전물의 무게를 측정하여 산출하였다.

동적점탄성 측정

밀가루와 원료별 식이섬유의 대체수준에 따라 혼합된 분말 3 g을 25 mL 증류수에 가하여 550 rpm에서 15분간 상온

에서 분산시킨 후, 95°C에서 550 rpm으로 10분간 증탕가열하였다. 호화된 겔을 상온에 10분간 방치 후 동적점탄성 측정에 사용하였다. 식이섬유 겔의 동적점탄성은 rheometer (RheoStress RS1, Thermo Haake, Germany)을 이용하여 25°C를 유지하면서 parallel-plate system(직경: 35 mm, 간격: 1 mm)에서 측정하였다. Strain sweep test 에서 얻은 0.1% strain에서 frequency sweep (0.1-10 Hz)을 수행하여 25°C를 유지하면서 밀가루 대체 식이섬유 겔의 저장탄성률(G')과 손실탄성률(G'')을 측정하였다.

In vitro 전분소화

전분소화패턴은 원료별 식이섬유를 함유한 밀가루 겔을 동적점탄성 측정 시와 동일하게 제조하여 4°C에서 하루 보관한 후 AACC(2000) methods 32-40과 Delgado-Andrade et al.(2010)의 방법을 변형하여 분석하였다. 식이섬유 함유 밀가루 겔 5g에 50 mL의 증류수를 가하여 균질화하여 pancreatin solution 12.5 mL(2.5 mL/g sample)과 amyloglucosidase solution (0.2 mL/g starch)를 첨가한 다음, 0.1 N HCl을 이용하여 pH 6으로 조정하여 37°C에서 3시간 동안 소화를 진행하였다. 전분소화 과정 중 0, 30, 90, 120, 180 분에 상등액 0.1 mL을 취하여 1.4 mL 에탄올을 가하여 1,600×g에서 3분간 원심분리 하여 상등액에 존재하는 glucose 함량을 GOPOD kit를 이용하여 측정하였다. 효소반응 30 분에 분해된 전분의 양을 rapidly digestible starch(RDS), 30 분에서 120분간 분해된 전분의 양을 slowly digestible starch(SDS), 이 후 180 분까지 분해되지 않은 전분의 양을 resistant starch(RS)으로 산출하였다.

통계 분석

모든 실험 결과들은 SPSS(Version 17.0, Chicago, IL, USA)를 이용하여 비교 분석하였다. 각 실험결과들은 One-way ANOVA(analysis of variance)와 Duncan's multiple range test($p < 0.05$)를 통하여 분석하였다. 원료별 식이섬유의 식이섬유 조성과 밀가루 대체 시 가공적성 및 전분소화에 관련된 변수와의 상관관계는 Pearson correlation coefficients을 통하여 분석하였다.

결과 및 고찰

원료별 식이섬유의 이화학적 성분 및 수화능

원료별 식이섬유의 IDF, SDF, TDF 및 IDF/SDF 비율은 Table 1과 같다. 식이섬유들의 IDF와 SDF함량은 각각 57.0-90.2%(감자 57.0% < 콩 67.9% < 귀리 84.6% < 밀 90.2%) 및 0.7-5.0%(콩 0.7% < 감자 3.0% < 밀 3.8% < 귀리 5.0%) 범위로 분석되었다. 원료별 식이섬유들의 TDF 함량은 60.0-94.1% 범위로 감자(60.0%) < 콩(68.6%) < 귀리(89.6%) < 밀(94.1%) 범위로 분석되었다. 위의 평균분석수치를 기준으로 SDF에 대한 IDF의 비율을 계산한 결과, 귀리(17) < 감자(19) < 밀(24) < 콩(97) 순으로 콩에서 유래한 식이섬유는 대부분이 불용성 식이섬유로 구성됨을 알 수 있었다.

수화능은 용매에 대한 시료의 흡착능으로 이스트의 활성이나 전분의 호화패턴에 영향을 주어 궁극적으로는 최종제품의 식품학적 특성과 관련되는 대표적인 지표로 이용될 수 있다(Rosell et al., 2009). 본 연구에서 사용한 원료별 식이섬유들의 수화능 중 수분흡수지수는 귀리(352.06) < 밀(502.52) < 감자(677.18) < 콩(862.78), 팽윤력은 귀리(3.53 g/g) < 밀(5.04 g/g) < 감자(7.08 g/g) < 콩(8.89 g/g) 순으로 유의적으로 높았다. 본 연구 결과, 상대적으로 낮은 TDF 함량과 높은 IDF비율을 보인 감자와 콩에서 유래한 식이섬유들이 우수한 수화능을 보였다. 이러한 결과는 IDF의 비율이 높은 코코아 분말이 다른 종류의 식이섬유보다 높은 수분흡수지수와 팽윤력을 보였다는 Lecumberri et al.(2007)의 보고와 유사하였다. Fuentes-Alventosa et al.(2009)도 다양한 식이섬유 추출물 중 IDF함량이 많은 아스파라거스 식이섬유 추출물의 높은 수분흡수지수와 팽윤력을 보고하여 식이섬유 내 IDF에 의하여 수화능이 증가됨을 확인할 수 있었다. 이와 같이 IDF가 수화능을 높이는 이유는 IDF 고분자 화합물의 구조 내에 수분을 보유할 수 있는 공간이 존재하여 상대적으로 SDF보다 수분에 대한 친화력이 높기 때문으로 보고하고 있다.

밀가루와 혼합 시 수화능 및 용매흡착능

원료별 식이섬유를 10-40%까지 밀가루에 대체함에 따른 수화능 변화는 Table 2와 같이 식이섬유 대체량이 증가함에 따라 수분흡착능과 팽윤력은 증가한 반면, 수분용해도

Table 1. Dietary fiber contents and hydration property of dietary fibers from various sources.

Sample	Dietary fiber composition (%)			IDF/SDF	Hydration property		
	Insoluble dietary fiber (IDF)	Soluble dietary fiber (SDF)	Total dietary fiber (TDF)		Water absorption index	Water solubility (%)	Swelling power (g/g)
Oat fiber	84.6±2.7 ^a	5.0±0.0 ^a	89.6±2.7 ^a	17	352.06±8.68 ^d	0.28±0.20 ^b	3.53±0.08 ^d
Pea fiber	67.9±0.9 ^b	0.7±0.2 ^b	68.6±0.6 ^b	97	862.78±31.76 ^a	2.94±1.59 ^a	8.89±0.18 ^a
Potato fiber	57.0±1.4 ^c	3.0±0.9 ^{ab}	60.0±2.3 ^b	19	677.18±1.57 ^b	4.35±0.12 ^a	7.08±0.01 ^b
Wheat fiber	90.2±4.2 ^a	3.8±1.9 ^a	94.1±6.1 ^a	24	502.52±6.51 ^c	0.49±0.37 ^b	5.04±0.06 ^c

Data represent the mean±standard deviation. Different small letters imply significant differences ($p < 0.05$).

Table 2. Effects of dietary fibers from various sources on hydration property of wheat flour.

Sample	Replacement (%)	Hydration property		
		Water absorption index	Water solubility (%)	Swelling power (g/g)
Oat fiber	10	231.97±7.75 ^{CB}	4.65±0.08 ^{CA}	2.43±0.08 ^{CB}
	20	242.60±9.93 ^{DB}	4.19±0.12 ^{BB}	2.53±0.10 ^{DB}
	40	296.32±9.38 ^{DA}	3.35±0.18 ^{CC}	3.07±0.10 ^{DA}
Pea fiber	10	275.08±4.86 ^{CC}	4.69±0.08 ^{CA}	2.89±0.05 ^{AC}
	20	352.23±5.39 ^{AB}	4.28±0.04 ^{BB}	3.68±0.06 ^{AB}
	40	514.84±8.51 ^{AA}	3.75±0.10 ^{BC}	5.35±0.09 ^{AA}
Potato fiber	10	253.72±8.63 ^{BC}	5.29±0.13 ^{AC}	2.68±0.09 ^{BC}
	20	299.12±5.42 ^{BB}	5.60±0.07 ^{AB}	3.17±0.06 ^{BB}
	40	406.77±11.74 ^{BA}	6.12±0.04 ^{AA}	4.33±0.13 ^{BA}
Wheat fiber	10	252.92±13.37 ^{BB}	4.93±0.09 ^{BA}	2.66±0.14 ^{BB}
	20	261.23±1.62 ^{BB}	4.27±0.10 ^{BB}	2.73±0.02 ^{CB}
	40	334.19±4.17 ^{CA}	3.32±0.14 ^{CC}	3.46±0.04 ^{CA}
Wheat flour	-	206.43±11.37	5.47±0.14	2.18±0.12

Data represent the mean±standard deviation. Different small letters imply significant differences within same replacement level ($p < 0.05$). Different capital letters imply significant differences within same dietary fiber group ($p < 0.05$).

는 감소하였다. 밀가루 자체의 수분흡착능과 팽윤력은 각각 206.43과 2.18 g/g에서 식이섬유가 40%까지 대체됨에 따라 귀리(296.32, 3.07 g/g) < 밀(334.19, 3.46 g/g) < 감자(406.77, 4.33 g/g) < 콩(514.84, 5.35 g/g) 순으로 증가하였다. 밀가루의 수분용해도는 5.47%에서 밀(3.32%) < 귀리(3.35%) < 콩(3.75%) 순으로 식이섬유가 대체됨에 따라 감소하였다. 그러나 감자에서 유래한 식이섬유를 혼합한 경우 오히려 대체량이 증가함에 따라 수분용해도가 5.29-6.12%까지 증가하였다. 이상과 같이, 밀가루에 식이섬유 대체량이 10-40%로 증가함에 따라 수분흡착능과 팽윤력은 최대 1.9 배 높아진 반면, 수분용해도는 감자 식이섬유를 제외하고는 최대 1.5 배까지 감소하였다. 또한 동일 대체비율에서 수분흡착능과 팽윤력은 귀리 < 밀 < 감자 < 콩 순으로 증가하였다.

용매흡착능(Solvent retention capacity, SRC)은 시료 내 polymer network형성에 따른 다양한 용매를 흡착하는 능력을 나타내는 지표이다 일반적으로 시료의 가공학적 특성을 예측하기 위하여 4 가지 용매(물, 설탕, sodium carbonate, lactic acid)를 이용한다. Water SRC(WSRC)는 시료가 전반적인 용매들에 흡착하는 성질, Sucrose SRC(SuSRC)는 pentosan의 함량과 gliadin의 특성, Sodium carbonate SRC(SCSRC)는 전분의 손상 정도, Lactic acid SRC(LASRC)는 글루텐의 특성과 관련되어 시료가 glutenin network를 형성하는 정도와 gluten구조의 강도를 나타내는 지표이다 (AACC, 2000; Duyvejonck et al., 2012). 원료별 식이섬유를 10-40%까지 밀가루에 대체함에 따른 용매흡착능 변화는 Table 3과 같다. 식이섬유 대체량이 증가함에 따라 물, 설탕, sodium carbonate, lactic acid에 대한 용매흡착능이 증가하였다. 밀가루 자체의 물, 설탕, sodium carbonate, lactic acid에 대한 용매흡착능은 각각 51.69, 96.31, 66.79,

91.78%로 분석되었다. 식이섬유가 40%까지 대체됨에 따라 각각 귀리(91.54, 134.71, 102.49, 83.96) < 밀(124.22, 182.53, 129.06, 103.80) < 감자(124.74, 190.65, 186.44, 117.46) < 콩(195.45, 246.24, 200.48, 167.52) 순으로 용매흡착능이 증가하였다. 이상과 같이, 밀가루에 식이섬유가 10-40%까지 대체됨에 따라 물, 설탕, sodium carbonate, lactic acid에 대한 용매흡착능이 각각 최대 최대 1.6, 2.3, 2.0, 2.0배 높아졌다. 또한 동일 대체비율에서 용매흡착능은 귀리 < 밀 < 감자 < 콩 순으로 증가하였다. 일반적으로 밀가루 전분에 식이섬유를 대체 시 글루텐-전분 구조가 희석되는 효과가 나타나는 반면, 일정농도 이상에서 일부 식이섬유는 오히려 글루텐-전분 구조 형성 능력을 갖는다(Angioloni & Collar, 2009). 이러한 식이섬유의 특성은 글루텐-단백질 network를 재형성하여 제빵에 적합한 특성으로 분류된다. 기존 연구에서 밀가루의 용매흡착능을 이용하여 식품모델에 적용하는 기준을 보면(AACC, 2000; Duyvejonck et al., 2012), 쿠키가공은 대체시료의 용매흡착능이 WSRC < 51%, SuSRC < 89%, SCSRC < 64%, LASRC > 87% 범위의 값을 가질 때 적합하다. 한편 케익과 반죽은 WSRC < 57%, SuSRC < 96%, SCSRC < 72%, LASRC > 100%, 범위에 있을 때 적합하다. 또한 직접반죽법으로 제빵가공을 적용할 경우에는 LASRC가 100% 이상 범위의 값을 가질 때 적합하다. 따라서 본 연구에서 사용한 원료별 식이섬유의 용매흡착능을 고려할 때 물, 설탕, sodium carbonate에 대해 대체적으로 낮은 흡착능을 보인 귀리 10% 대체가 쿠키나 케익에 활용 가능성을 보인 반면, 높은 lactic acid 흡착능을 보인 콩 10-40%, 감자와 밀은 40% 대체는 직접반죽법으로 제조하는 제빵소재로 가능성을 알 수 있었다. 그러나 전반적으로 밀가루를 대체함에 따라 귀리 식이섬유는 lactic

Table 3. Effects of dietary fibers from various sources on solvent retention capacity of wheat flour.

Sample	Replacement (%)	Solvent retention capacity (%)			
		Water	Sucrose	Sodium carbonate	Lactic acid
Oat fiber	10	56.14±1.80 ^{dC}	95.65±0.64 ^{aC}	69.70±0.13 ^{bC}	79.14±2.27 ^{bB}
	20	66.62±1.37 ^{cB}	105.89±0.92 ^{cB}	79.37±0.61 ^{bB}	75.99±0.67 ^{bB}
	40	91.54±0.61 ^{cA}	134.71±1.66 ^{cA}	102.49±1.22 ^{dA}	83.96±0.23 ^{dA}
Pea fiber	10	83.77±0.17 ^{aC}	105.51±7.18 ^{aC}	91.67±11.34 ^{aC}	90.27±2.42 ^{aB}
	20	119.40±4.34 ^{aB}	153.27±18.12 ^{aB}	135.04±17.78 ^{aB}	103.43±4.52 ^{aB}
	40	195.45±3.74 ^{aA}	246.24±7.87 ^{aA}	200.48±3.37 ^{aA}	167.52±5.94 ^{aA}
Potato fiber	10	65.67±1.16 ^{bC}	107.77±5.55 ^{aC}	92.68±1.81 ^{aC}	80.13±1.61 ^{bB}
	20	85.49±2.30 ^{bB}	124.87±3.89 ^{bB}	128.46±2.24 ^{bB}	84.07±3.59 ^{bB}
	40	124.74±0.84 ^{bA}	190.65±1.03 ^{bA}	186.44±4.52 ^{bA}	117.46±5.77 ^{bA}
Wheat fiber	10	61.28±1.56 ^{cC}	100.04±0.03 ^{aC}	74.47±1.52 ^{bC}	81.05±1.37 ^{bB}
	20	77.84±2.10 ^{bB}	122.06±1.64 ^{bB}	90.18±1.18 ^{bB}	76.97±1.01 ^{bB}
	40	124.22±2.28 ^{bA}	182.53±4.11 ^{bA}	129.06±1.76 ^{cA}	103.80±3.04 ^{cA}
Wheat flour	-	51.69±3.22	96.31±5.86	66.79±3.64	91.78±6.68

Data represent the mean±standard deviation. Different small letters imply significant differences within same replacement level ($p < 0.05$). Different capital letters imply significant differences within same dietary fiber group ($p < 0.05$).

acid에 대한 흡착능을 감소시켜 gluten network 형성 감소로 강도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 감자 식이섬유는 밀가루 대체 시 gluten 강도는 증가시키지만 전분손상을 초래할 수 있음을 인지하여 고식이 섬유 소재로 제빵가공에 적용하고자 할 때 소재 간 혼합이나 첨가물 사용 등을 통한 관능적 품질유지노력이 필요하다.

식이섬유 함유 밀가루 겔의 동적점탄성 변화

겔 제조 시 밀가루 대신 원료별 식이섬유를 10-40%까지 대체함에 따른 저장탄성률(G')과 손실탄성률(G'') 변화는

Fig. 1과 같다. 밀가루 겔의 동적점탄성은 콩과 감자에서 유래한 식이섬유를 대체한 경우에는 농도의존적으로 증가한 반면, 귀리와 밀 식이섬유 대체에 의해 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 콩과 감자 식이섬유가 귀리와 밀 식이섬유에 비하여 상대적으로 높은 IDF 비율과 SCSRC의 높은 증가에서 기인함을 알 수 있었다. 즉, IDF는 밀가루 겔 구조 내에 물을 보유하는 능력을 향상시키고 (Fuentes-Alventosa et al. 2009), SCSRC는 전분 손상도와 연결되어 손상된 전분은 수분보유능 증가로 전분 손상 정도가 높을수록 점성이 증가하는 경향을 보이게 된다

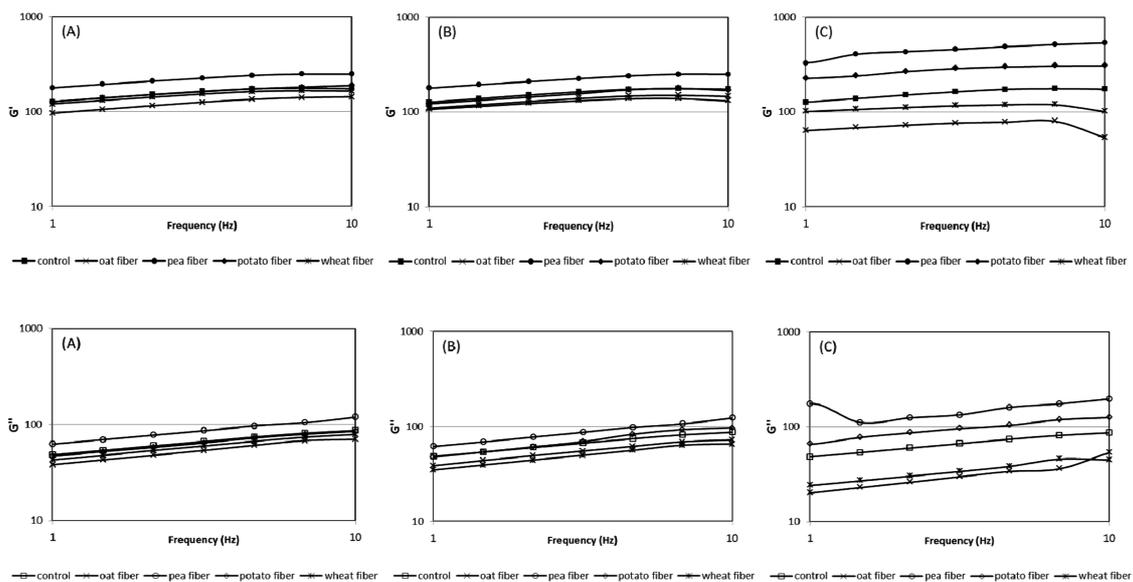


Fig. 1. Effects of dietary fibers from various sources at 10% (A), 20% (B), and 40% (C) on the storage modulus (G' , closed symbol) and loss modulus (G'' , open symbol) of wheat flour gels.

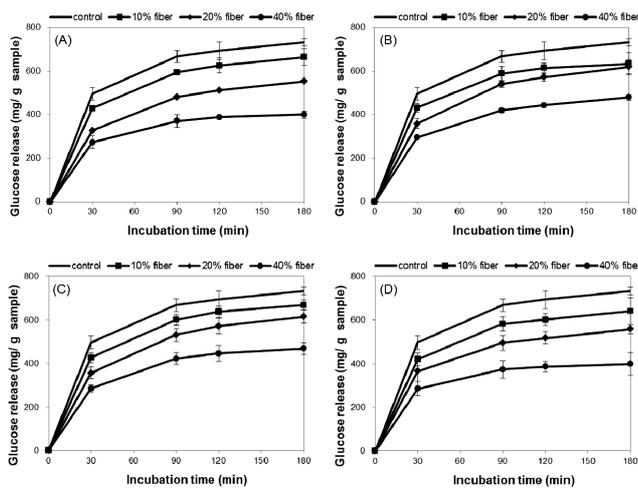


Fig. 2. Glucose release behavior in wheat flour gels with dietary fibers from oat (A), pea (B), potato (C), and wheat (D) at 10%, 20%, and 40% during *in vitro* starch digestion.

(Duyvejonck et al. 2012). 한편, 귀리와 밀 식이섬유는 상대적으로 높은 SDF비율을 보임으로써 밀가루에 대체될 때 오히려 전분과 반응할 수분을 경쟁적으로 공유함으로써 전분이 충분히 소화되어 점성을 발생시키는 현상을 제어함에 따라 겔의 점탄성이 감소한 것으로 보인다(Kim et al., 2011).

이상과 같이, 식이섬유는 조성에 따라 수화능과 용매흡착능 및 동적점탄성에서 밀가루 대체 시 다양한 변화를 초래함을 확인하였다. 따라서 건강기능적 측면에서 제과제빵

용으로의 활용을 위하여 식이섬유들의 밀가루 대체 시 전분소화를 어느 정도 지연시킬 수 있는지를 평가하였다.

식이섬유 함유 밀가루 겔의 전분소화지연효과

밀가루 겔에 다양한 원료별 식이섬유가 대체됨에 따라 *in vitro* 전분소화모델에서 단위시간마다 방출되는 glucose의 양은 Fig. 2와 같다. 식이섬유를 이용하여 겔의 밀가루를 10, 20, 40%로 대체함에 따라 전분이 분해되어 방출되는 glucose 양은 농도의존적으로 감소하였다. 식이섬유는 water immobilization을 통하여 점성을 증가시키고, 당과 단백질 사이의 구조 형성을 방해하여 소화효소가 전분에 접근되는 것을 제어함으로써 전분소화로 인한 glucose 방출을 감소시키는 것으로 알려져 있다(Sasaki et al., 2011). 한편, 동일한 대체 비율에서 원료별 식이섬유가 밀가루 겔의 전분소화지연에 미치는 효과는 유의적인 차이가 없어 식이섬유의 특성보다는 대체량이 중요함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 SDF/IDF 비율을 25%씩 조정된 식이섬유 혼합물을 농도별로 대체한 밀가루 겔이나 케익 모델에서 SDF/IDF 비율보다는 대체한 식이섬유 함량이 전분소화에 유의적으로 영향을 준다는 보고와 일치하였다. 일반적으로 식이섬유 중 SDF는 높은 점성으로 전분소화를 저해하지만, 점성을 형성하지 못하는 수준으로 첨가될 경우에는 전분 가수분해를 저해하는 효과를 나타내지 못한다. 한편, IDF는 수분을 보유하는 성질이 강하여 전분이 팽윤하는 현상과 전분 가수분해효소의 작용을 저해함으로써 전분소화를 지연시킨다고 보고되고 있다(Fuentes-Alventosa et al., 2009; Aravind et al., 2012). 따라서 본 논문에서 사용한 원료별

Table 4. Starch digestion fractions of wheat flour gels with dietary fibers from various sources.

Sample	Replacement (%)	Starch digestion fraction (mg/ g starch)			Predicted glycemic index (pGI)
		Rapidly digestible starch (RDS)	Slowly digestible starch (SDS)	Resistant starch (RS)	
Oat fiber	0	642.67±39.68 ^a	255.84±53.29 ^a	102.54±50.34 ^a	101.34±2.61 ^a
	10	617.15±16.09 ^a	283.99±39.61 ^a	98.86±49.73 ^a	100.79±0.90 ^a
	20	530.23±55.71 ^b	298.05±69.23 ^a	171.72±65.49 ^a	95.21±4.19 ^b
	40	589.72±65.20 ^{ab}	250.90±74.54 ^a	159.38±20.62 ^a	96.16±3.69 ^b
Pea fiber	0	642.67±39.68 ^a	255.84±53.29 ^b	102.54±50.34 ^a	101.34±2.61 ^a
	10	608.94±28.90 ^b	257.95±14.95 ^b	133.12±29.25 ^a	98.79±3.53 ^b
	20	553.18±35.04 ^c	330.37±32.34 ^a	116.46±27.72 ^a	99.27±1.91 ^{ab}
	40	564.70±9.32 ^c	283.48±18.73 ^b	151.82±17.71 ^a	96.88±1.21 ^b
Potato fiber	0	642.67±39.68 ^a	255.84±53.29 ^b	102.54±50.34 ^b	101.34±2.61 ^a
	10	595.33±32.71 ^b	294.11±30.35 ^{ab}	110.56±36.03 ^b	99.44±2.56 ^{ab}
	20	538.00±41.34 ^c	326.82±60.14 ^a	135.18±55.56 ^{ab}	96.94±3.10 ^{bc}
	40	518.23±29.07 ^c	293.08±41.36 ^{ab}	188.69±66.04 ^a	94.44±3.54 ^c
Wheat fiber	0	642.67±39.68 ^a	255.84±53.29 ^a	102.54±50.34 ^a	101.34±2.61 ^a
	10	603.10±42.36 ^a	261.88±35.73 ^a	135.02±38.97 ^a	99.06±3.77 ^a
	20	590.89±74.17 ^a	246.39±38.58 ^a	162.72±45.17 ^a	96.84±3.99 ^a
	40	614.11±70.78 ^a	220.72±50.40 ^a	165.17±53.71 ^a	97.23±6.20 ^a

Data represent the mean±standard deviation. Different small letters imply significant differences within same dietary fiber group ($p < 0.05$).

식이섬유들의 IDF/SDF 비율 간 차이에도 불구하고 주로 IDF로 구성된 성분특성으로 절대적으로 부족한 SDF 함량이 그 역할을 다하지 못한 것으로 사료된다.

원료별 식이섬유 대체에 따른 밀가루 겔의 전분소화 후 생성된 RDS, SDS, RS 및 pGI값은 Table 4와 같다. 밀가루 대신 식이섬유를 40%까지 대체함에 따라 RDS함량은 642.67에서 518.23 mg/g starch로 최대 1.2 배까지 농도의존적으로 감소하였다. 그러나 SDS함량은 255.84에서 330.37 mg/g starch로 대체 농도 증가에 따른 유의적인 차이가 없었다. 한편, 식이섬유 대체에 따른 RS함량은 102.54에서 188.69 mg/g starch로 최대 1.8 배까지 유의적으로 증가하였으나, 감자 식이섬유를 제외한 다른 식이섬유를 밀가루 대신 첨가한 겔에서 농도 증가에 따른 유의적인 차이가 없었다. Thondre et al.(2010)은 베타글루칸의 대체비율이 높아질수록 RDS 함량이 농도의존적으로 감소하였음을 보고하였다. 베타글루칸은 전분의 미세구조를 변화시켜 소화효소의 접근을 방해하고, 전분 수화와 호화를 저해하여 결과적으로 RDS생성을 감소시킨 것으로 고찰하였다. 전분기반식품의 RS함량은 식품의 이화학적 성분, 물리적 형태, 열처리 조건 등에 따른 전분과 식품 내 다른 성분 간의 상호작용에 의해 영향을 받는다. 이와 같이, 전분소화에서 RDS 및 RS 함량은 식후 혈당 상승의 주요인자로 작용한다(Goni et al., 1997). 또한 식이섬유 대체비율이 높은 겔에서 유의적으로 낮은 pGI값을 보였다. 특히, 대조군인 밀가루 100% 겔의 경우 pGI 101.34에서 귀리, 콩, 감자 식이섬유를 각각 40% 대체함에 따라 96.16, 96.88, 94.44까지 감소하였다. 결과적으로, 콩과 감자 식이섬유의 대체비율이 증가함에 따라 RDS 함량과 pGI수치가 유의적으로 감소됨을 확인할 수 있었다.

원료별 식이섬유의 조성 및 밀가루 대체 시 가공적성 및 전분소화 특성 간 상관성

다양한 원료에서 유래한 식이섬유의 조성 및 밀가루 대신 대체한 경우 수화능, 용매흡착능, 동적점탄성 및 전분소화와 관련된 다양한 변수간의 상관관계는 Table 5와 같다. 식이섬유 조성 중 IDF 함량은 수분흡수지수와 WSRC에 대해 양의 상관성을 보인 반면, 수분용해도와는 음의 상관성을 나타냈다($p < 0.05$). 특히, IDF는 유의수준 0.05에서 WSRC와 양의 상관성을 보였고, SuSRC와 RS함량에 대해서는 유의수준 0.01에서 강한 양의 상관성 및 pGI와는 강한 음의 상관성을 보였다. SDF는 RS함량과 강한 양의 상관성을 보였으나($p < 0.01$), pGI와는 음의 상관성을 보였다($p < 0.05$). TDF는 수분흡수지수, WSRC, SuSRC와 양의 상관성을 나타낸 반면, 수분용해도에 대해서는 음의 상관성을 보였다($p < 0.05$). 또한, TDF는 RS함량과 강한 양의 상관성을 보였으나, pGI와는 강한 음의 상관성을 나타냈다($p < 0.01$). 결과적으로, 수화능 중 수분흡수지수는 IDF 및 TDF와 양의 상관성을 보인 반면, 수분용해도는 음의 상관

Table 5. Relationship among fiber composition of various dietary fibers and their hydration property, solvent retention capacity, rheological property, and starch digestibility in wheat flour model gel.

	IDF	SDF	TDF
<i>Hydration property</i>			
Water absorption index	0.584*	0.094	0.564*
Water solubility	-0.666*	-0.417	-0.659*
Swelling power	0.569*	0.086	0.549
<i>Solvent retention property</i>			
Water	0.641*	0.110	0.620*
Sugar	0.695**	0.217	0.677*
Sodium carbonate	0.552	0.142	0.535
Lactic acid	0.414	0.114	0.390
<i>Rheological property</i>			
Elastic modulus	0.096	-0.393	0.071
Viscous modulus	0.091	-0.421	0.065
<i>Starch digestibility</i>			
Rapidly digestible starch	-0.271	-0.217	-0.271
Slowly digestible starch	-0.335	-0.355	-0.340
Resistant starch	0.736**	0.687**	0.741**
pGI	-0.690**	-0.668*	-0.696**

*Significant at $p < 0.05$, **Significant at $p < 0.01$.

성을 보였다. 용매흡착능의 경우에는 물과 설탕은 IDF 및 TDF 함량과 양의 상관성이 있었으나, sodium carbonate와 lactic acid 및 동적점탄성은 식이섬유 조성 및 함량과는 유의적인 관계가 없었다. 한편, IDF, SDF 및 TDF는 전분소화 후 잔류되는 RS 함량을 유의적으로 증가시킨 반면, 예상혈당수치인 pGI값은 유의적으로 감소시키는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 식이섬유가 전분기반식품에 활용 시 전분소화를 지연시킴으로써 저혈당 소재로 적합함을 확인할 수 있는 가장 대표적인 측정치는 pGI값이다. 본 연구에서 제시한 상관성 분석결과를 보면, SDF 함량보다 IDF 및 TDF 함량이 더 유의적인 음의 상관관계를 보였다. 따라서 밀가루 기반 식품 섭취 후 전분소화를 지연시킴으로써 혈당을 감소시키는 효과는 수용성 식이섬유보다는 불용성 및 총식이섬유 함량이 더 큰 영향을 미치는 것을 예상할 수 있었다.

요 약

귀리, 콩, 감자, 밀에서 유래한 다양한 식이섬유를 밀가루 대신 10-40%까지 대체함에 따른 수화능, 동적점탄성, 용매흡착능 및 *in vitro* starch digestion을 비교하였다. 귀리, 콩, 감자, 밀에서 유래한 다양한 식이섬유를 식이섬유의 대체비율이 증가할수록 수분흡착능과 팽윤력은 증가한 반면, 수분용해도는 감소하였다. 밀가루 대신 콩과 감자 식이섬유를 대체함에 따라 동적점탄성은 증가하였으나, 귀리

와 밀 식이섬유 대체에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 식이섬유 대체에 따른 밀가루의 용매흡착능 변화를 분석한 결과, 낮은 대체량의 귀리 식이섬유와 높은 대체량의 콩과 감자 식이섬유가 활용 가능성을 보였다. 원료별 식이섬유 대체 시 밀가루 겔의 전분소화 패턴은 식이섬유 대체 비율이 증가함에 따라 glucose 방출은 감소하였으나, 원료별 특성에 따른 유의적인 차이는 없었다. 특히, 밀식이섬유를 제외한 귀리, 콩, 감자 식이섬유는 모두 RDS감소와 RS 증가에 따른 pGI 저하를 보여 실제 식품소재로 활용 시 가공적성을 유지할 수 있다면 전분소화지연효과를 기대할 수 있음을 확인할 수 있었다. 한편, 식이섬유의 원료에 따른 식이섬유 조성과 전분소화 관련 특성 간 상관관계를 분석한 결과, 전분소화를 지연시키는 효과는 수용성 식이섬유보다는 불용성과 총식이섬유 함량이 중요한 인자임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 여성과학자지원사업(과제번호-2012R1A1A3007853)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (No. 991.43). Washington DC, USA.
- AACC. 2000. Approved Methods of the American Association of the Cereal Chemists (No. 32.40; No. 56.11), St. Paul, MN, USA.
- Angioloni A, Collar C. 2009. Gel, dough and fibre enriched fresh breads: Relationships between quality features and staling kinetics. *J. Food Eng.* 91: 526-532.
- Angioloni A, Collar C. 2009a. Small and large deformation viscoelastic behavior of selected fiber blends with gelling properties. *Food Hydrocolloid.* 23: 742-748.
- Angioloni A, Collar C. 2011. Physicochemical and nutritional properties of reduced-caloric density high-fibre breads. *LWT-Food Sci. Technol.* 44: 747-758.
- Aravind N, Sissons M, Egan N, Fellows C. 2012. Effect of insoluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti. *Food Chem.* 130: 299-309.
- Delago-Andrade C, Conde-Aguilera JA, Haro. A, Pastoriza S, Rufian-Henares JA. 2010. A combined procedure to evaluate the global antioxidant response of bread. *J. Cereal Sci.* 52: 239-246.
- Dikeman CL, Fahey GC. 2006. Viscosity as related to dietary fiber: A Review. *Crit Rev Food Sci.* 46: 649-663.
- Duyvejonck AE, Lagrain B, Dornez E, Jan A, Delcour, Courtin CM. 2012. Suitability of solvent retention capacity tests to assess the cookie and bread making quality of European wheat ours. *LWT-Food Sci. Technol.* 47: 56-63.
- Elleuch M, Bedigian D, Roiseux O, Besbes S, Blecker C, Attia H. 2011. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chem.* 124: 411-421.
- Fuentes-Alventosa JM, Rodríguez-Gutiérrez G, Jaramillo-Carmona S, Espejo-Calvo JA, Rodríguez-Arcos R, Fernández-Bolaños J, Guillén-Bejarano R, Jiménez-Araujo A. 2009. Effect of extraction method on chemical composition and functional characteristics of high dietary fibre powders obtained from asparagus by-products. *Food Chem.* 113: 665-671.
- Goni I, Garcia-Alonso A, Saura-Calixto F. 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutr Res.* 17: 427-437.
- Kim JY, Lee SM, Bae IY, Park HG, Lee HG, Lee S. 2011. (1-3)(1-6)- β -Glucan-enriched materials from *Lentinus edodes* mushroom as a high-fibre and low-calorie flour substitute for baked foods. *J. Sci. Food Agr.* 91: 1915-1919.
- Lee S, Inglett GE. 2006. Functional characterization of steam jet-cooked β -glucan-rich barley flour as an oil barrier in frying batters. *J. Food Sci.* 71: 308-313.
- Lecumberri E, Mateos R, Izquierdo-Pulido M, Ruperez P, Goya L, Bravo L. 2007. Dietary fibre composition, antioxidant capacity and physico-chemical properties of a fibre-rich product from cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Food Chem.* 104: 948-954.
- Mann JI, Cummings JH. 2009. Possible implications for health of the different definitions of dietary fibre. *Nutr Metab Cardiovas.* 19: 226-229.
- Navarro-González I, García-Valverde V, García-Alonso J, Periago MJ. 2011. Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber. *Food Res. Int.* 44: 1528-1535.
- Pourfarzad A, Mahdavian-Mehr H, Sedaghat N. 2013. Coffee silverskin as a source of dietary fibre in bread-making: Optimization of chemical treatment using response surface methodology. *LWT-Food Sci. Technol.* 50: 599-606.
- Rosell CM, Santos E, Collar C. 2009. Physico-chemical properties of commercial fibres from different sources: A comparative approach. *Food Res. Int.* 42: 176-184.
- Sasaki T, Kohyama K. 2011. Effect of non-starch polysaccharides on the in vitro digestibility and rheological properties of rice starch gel. *Food Chem.* 127: 541-546.
- Thondre PS, Monro JA, Mishra S, Henry CJK. 2010. High molecular weight barley β -glucan decreases particle breakdown in chapattis (Indian flat breads) during in vitro digestion. *Food Res. Int.* 43: 1476-1481.